

УДК 539.172.1

ВРЕМЕННАЯ ШКАЛА ПРОЦЕССА ТЕПЛОВОЙ МУЛЬТИФРАГМЕНТАЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЯДЕР УГЛЕРОДА С ЭНЕРГИЕЙ 22 ГЭВ С ЗОЛОТОЙ МИШЕНЬЮ

© 2021 г. С. П. Авдеев^{1, *}, В. Карч¹, В. В. Киракосян¹, П. А. Рукояткин¹,
В. И. Стегайлов¹, А. С. Ботвина²

¹Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

²Институт перспективных исследований во Франкфурте, Франкфуртский университет имени Иоганна Вольфганга,
Франкфурт-на-Майне, Германия

*E-mail: avdeyev@aol.com

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

Исследованы корреляции фрагментов промежуточной массы по относительным углам для взаимодействия $^{12}\text{C} + \text{Au}$ с энергией пучка 22 ГэВ. Установлено наличие сильного подавления событий с малыми относительными углами, обусловленного кулоновским отталкиванием фрагментов. Проведено сравнение экспериментальной корреляционной функции с результатами расчетов кулоновских траекторий многотельной системы с разным временем жизни системы. Получено значение среднего времени жизни фрагментирующей системы менее 59 ± 11 фм \cdot с⁻¹.

DOI: 10.31857/S0367676521100069

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процесса мультифрагментации дает экспериментальную информацию о ядерной спиноподальной области. Распад с испусканием фрагментов промежуточной массы IMF, фрагменты с зарядами от 3 до 20 трактуется как фазовый переход “жидкость–газ”, происходящий при температуре 5–7 МэВ [1]. Для исследования процесса мультифрагментации были созданы многодетекторные 4π-установки, такие как ALADIN [2, 3] и FOPI [4] (GSI), INDRA [5] (GANIL), Miniball [6] (MSU), ISiS [7] (Bloomington, IN), ФАЗА [8, 9], (ОИЯИ), NIMROD [10, 11] (TAMU), FIASCO [12, 13] (INFN). Изучение временной шкалы процесса множественного образования фрагментов является ключевым моментом в понимании способа распада сильно возбужденных ядер. Это последовательный процесс независимого испарения IMF или это новый многотельный способ распада с одновременной эмиссией фрагментов, регулируемый полным доступным фазовым объемом? В работе [14] было предположено, что одновременная эмиссия IMF происходит в объеме freeze-out за время меньшее, чем время кулоновского взаимодействия $\tau_c \approx 300\text{--}400$ фм \cdot с⁻¹. В этом случае испускание фрагментов не является независимым т.к. происходит кулоновское взаимодействие при ускорении в общем электриче-

ском поле. Таким образом, измерение временных интервалов τ_{em} между последовательно испущенными фрагментами или измерение времени жизни τ фрагментирующей системы является прямым способом ответа на вопрос о природе множественного образования фрагментов. Есть простое соотношение между этими величинами через среднюю множественность IMF [15, 16].

Для экспериментального определения временной шкалы процесса используются две процедуры: анализ корреляционной функции IMF-IMF для относительных углов между фрагментами или для относительных скоростей между фрагментами. Корреляционная функция претерпевает минимум при уменьшении относительного угла (или относительной скорости) между фрагментами в силу кулоновского отталкивания между совпадающими фрагментами. Величина этого эффекта сильно зависит от среднего времени эмиссии фрагментов, т.к. чем больше по времени разделены фрагменты, тем больше они разделены в пространстве и тем слабее кулоновское отталкивание. Временная шкала эмиссии фрагментов определяется из сравнения измеренной корреляционной функции и расчетной корреляционной функции, полученной для многотельных кулоновских траекторий. Время жизни системы τ (или τ_{em}) в расчетах было параметром. Использовалось следующее вы-

ражение для построения корреляционной функции в относительных углах

$$1 + R(\Theta_{rel}) = C \frac{N_{cor}(\Theta_{rel})}{N_{uncor}(\Theta_{rel})}, \quad (1)$$

где $N_{cor}(\Theta)$ — выход в зависимости от относительных углов для совпадающих IMF, $N_{uncor}(\Theta)$ — выход в зависимости от относительных углов для пар IMF из разных событий. C — нормировочная константа.

Первые измерения временной шкалы тепловой мультифрагментации были выполнены в работах [15, 16] для взаимодействия ${}^4\text{He}(14.6 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$ из анализа относительных угловых корреляций IMF–IMF. Было получено время жизни системы меньше $75 \text{ фм} \cdot \text{с}^{-1}$. Позднее, анализ относительных угловых корреляций для взаимодействия ${}^3\text{He}(4.8 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$ [17] позволил определить время жизни этой системы, равное $20\text{--}50 \text{ фм} \cdot \text{с}^{-1}$. В работе [18] было показано, что при взаимодействии релятивистских протонов с золотой мишенью происходит переход от последовательной эмиссии фрагментов (при энергии протонов 2.1 ГэВ) к одновременному многотельному распаду горячей, расширенной системы (при энергии протонов 8.1 ГэВ). В этой работе определена временная шкала множественной эмиссии фрагментов для взаимодействия ${}^{12}\text{C}(22 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$. Энергия возбуждения для этого взаимодействия является полностью тепловой, отсутствует сжатие и вращение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные измерения выполнялись на 4π -установке ФАЗА [19, 20], расположенной на выведенном пучке сверхпроводящего ускорителя НУКЛОТРОН в Дубне. Установка состоит из двух основных частей:

1) Тридцать телескопов $\Delta E - E$, которые измеряют заряд фрагмента и его кинетическую энергию, и используются в качестве триггеров для чтения информации со всех детекторов установки. Ионизационные камеры и Si(Au)-детекторы использовались в качестве ΔE и E счетчиков.

2) Детектор множественности фрагментов (FMD) состоящий из 58 CsI(Tl) счетчиков (средняя толщина сцинтиллятора $35 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$), который покрывает 81% от полного телесного угла 4π . FMD дает число IMF в событии и их угловое распределение.

Использовалась золотая мишень толщиной $1.0\text{--}1.5 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$, которая располагалась в центре вакуумной камеры установки ФАЗА. Интенсивность пучка составляла 10^9 частиц в сбросе (продолжительность сброса — 300 мс, период сброса — 10 с).

Стартовые условия для расчета многотельных кулоновских траекторий всех фрагментов генерировались внутриядерным каскадом (INC) [9] и статистической моделью мультифрагментации (SMM) [10] (использовалась платформа HybriLIT, ЛИТ, ОИЯИ). Модель INC использовалась для получения распределения ядра-остатка по энергии возбуждения. SMM описывает снятие возбуждения пре-фрагментов и получение холодных IMF в объеме freeze-out с плотностью в три раза меньшей, чем нормальная ядерная плотность. Для оценки неопределенности в теоретических результатах в определении среднего времени жизни фрагментирующей системы были выполнены два варианта расчетов: с предравновесной эмиссией легких частиц и без предравновесной эмиссии. В расчете без предравновесной эмиссии энергия возбуждения ядра-остатка после каскада уменьшалась для получения согласия с экспериментальными данными для средней множественности IMF. В расчете с предравновесной эмиссией такая поправка была не нужна.

Расчеты корреляционных функций проводились для множественности IMF в событии больше единицы и заряда хотя бы одного из фрагментов в событии больше пяти. Начальное время движения вдоль Кулоновской траектории для каждого фрагмента выбиралось в соответствии с вероятностью распада системы: $P(t) \sim \exp(-t/\tau)$. Были выполнены расчеты с использованием платформы HybriLIT, ЛИТ ОИЯИ для мгновенного распада системы и для системы с временем жизни $\tau = 200 \text{ фм} \cdot \text{с}^{-1}$. На рис. 1 показана измеренная корреляционная функция (точки) и расчетные корреляционные функции для freeze-out объема $V_f = 3V_0$.

Для измерения величины отталкивания фрагментов в событии использовались значения корреляционной функции для относительного угла $\theta_{rel} = 26^\circ$. Эти значения в функции τ (среднего времени жизни системы) показаны на рис. 2. Линия — расчетное значение корреляционной функции для относительного угла $\theta_{rel} = 26^\circ$. Расчет выполнялся для freeze-out объема $V_f = 3V_0$. Пересечение расчетной линии с горизонтальной полосой (соответствующей экспериментальному значению с ошибкой $\pm 3\sigma$) определяет среднее время жизни фрагментирующей системы, образующейся в реакции ${}^{12}\text{C}(22 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$. Получено, что среднее время жизни фрагментирующей системы меньше $70 \text{ фм} \cdot \text{с}^{-1}$ для расчета с предравновесной эмиссией и меньше $48 \text{ фм} \cdot \text{с}^{-1}$ для расчета без предравновесной эмиссии. Следовательно, можно заключить, что среднее время жизни фрагментирующей системы меньше $\tau = 59 \pm 11 \text{ фм} \cdot \text{с}^{-1}$.

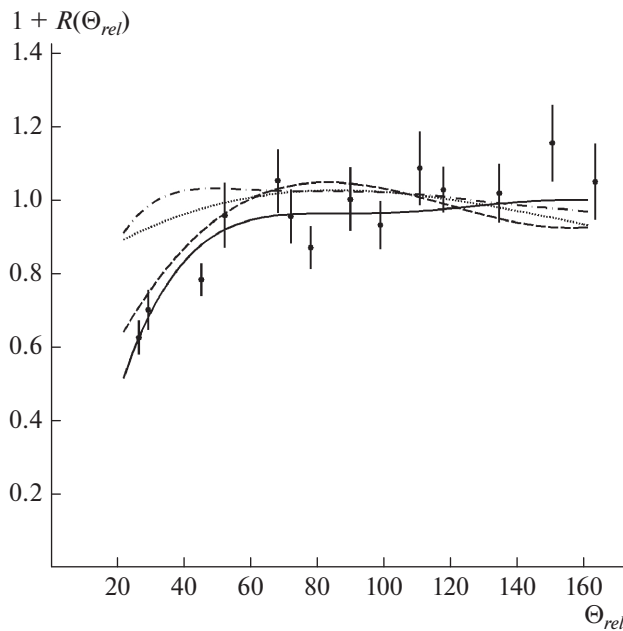


Рис. 1. Корреляционная функция для относительных углов IMF образованных при взаимодействии $^{12}\text{C}(22 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$. Точки – экспериментальные данные. Сплошная линия – расчет INC + SMM с предравновесием для мгновенного распада спектра мишени. Штриховая линия – расчет INC + SMM без предравновесия для мгновенного распада спектра мишени. Пунктирная линия соответствует расчету INC + SMM без предравновесия со средним временем распада системы $200 \text{ фм} \cdot \text{с}^{-1}$. Штрих-пунктирная линия соответствует расчету INC + SMM с предравновесием со средним временем распада $200 \text{ фм} \cdot \text{с}^{-1}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен сравнительный анализ корреляционной функции для относительных углов между фрагментами промежуточной массы, образованными в процессе тепловой мультифрагментации при взаимодействии ядер углерода с энергией 22 ГэВ и золотой мишени. Анализ был выполнен в по-событийном режиме. Стартовые условия для расчета многотельных кулоновских траекторий задавались внутриядерным каскадом и статистической моделью мультифрагментации. Измеренная корреляционная функция сравнивалась с расчетной для измерения временной шкалы эмиссии IMF. Расчет выполнялся для разного времени жизни системы τ и freeze-out объема $V_f = 3V_0$, когда плотность системы в три раза меньше нормальной.

Получено хорошее согласие измеренной корреляционной функции и расчетной для мгновенного распада системы. Получено, что процесс мультифрагментации при взаимодействии $^{12}\text{C}(22 \text{ ГэВ}) + \text{Au}$ происходит за время меньше, чем $\tau = 59 \pm 11 \text{ фм} \cdot \text{с}^{-1}$, что соответствует одновременному

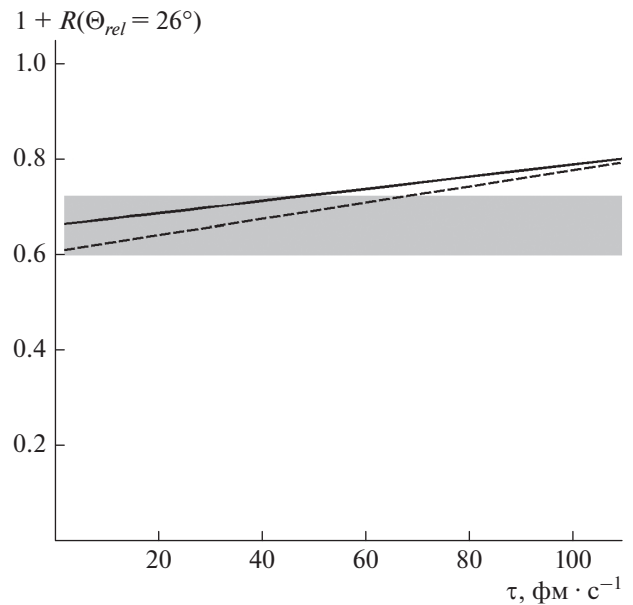


Рис. 2. Значение корреляционной функции при относительном угле $\theta_{rel} = 26^\circ$ в зависимости от среднего времени жизни системы. Эксперимент представлен в виде горизонтальной полосы. Сплошная линия – расчет INC + SMM без предравновесия. Штрихованная линия – расчет INC + SMM с предравновесием.

многотельному распаду горячей и расширенной системы.

Авторы благодарны А.И. Малахову и В.Д. Кекелидзе за поддержку этой работы, В.В. Коренькову за возможность использования платформы HybriLIT, ЛИТ ОИЯИ. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 19-02-00499a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Karnaukhov V.A.* // Phys. Atom. Nucl. 2014. V. 77. № 1. P. 117.
2. *Schuttauf A., Kunze W.D., Wornor A. et al.* // Nucl. Phys. A. 1996. V. 607. P. 457.
3. *Brzychczyk J., Pietrzak T., Wieloch A. et al.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 98. Art. No. 054606.
4. *Gobi A., Alard J.P., Augustinski G. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 1993. V. 324. P. 156.
5. *Pouthas J., Borderie B., Dayras R. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 1995. V. 357. P. 418.
6. *De Souza R.T., Carlin N., Kim Y.D. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 1990. V. 295. P. 109.
7. *Kwiatkowski K., Bracken D.S., Morley K.B. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 1995. V. 360. P. 571.
8. *Avdeyev S.P., Karnaukhov V.A., Kuznetsov W.D. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 1993. V. 332. P. 149.
9. *Kirakosyan V.V., Simonenko A.V., Avdeev S.P. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2008. V. 51. No. 2. P. 159.

10. Wuenschel S., Hagel K., Wada R. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2009. V. 604. P. 578.
11. Wada R., Lin W., Ren P. et al. // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. Art. No. 024616.
12. Bini M., Casini G., Olmi A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. V. 515. P. 497.
13. Piantelli S., Olmi A., Maurenzig P.R. et al. // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. Art. No. 064616.
14. Shapiro O., Gross D.H.E. // Nucl. Phys. A. 1994. V. 573. P. 143.
15. Lips V., Barth R., Oeschler H. et al. // Phys. Lett. B. 1994. V. 338. P. 141.
16. Shmakov S.Yu., Avdeyev S.P., Karnaukhov V.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. 1995. V. 58. No. 10. P. 1735.
17. Wang G., Kwiatkowski K., Bracken D.S. et al. // Phys. Rev. C. 1998. V. 57. No. 6. Art. No. R2786.
18. Avdeyev S.P., Karnaukhov V.A., Oeschler H. et al. // J. Mod. Phys. 2013. V. 4. P. 1504.
19. Avdeyev S.P., Karnaukhov V.A., Kuznetsov W.D. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 1993. V. 332. P. 149.
20. Kirakosyan V.V., Simonenko A.V., Avdeyev S.P. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2008. V. 51. No. 2. P. 159.
21. Toneev V.D., Amelin N.S., Gudima K.K. et al. // Nucl. Phys. A. 1990. V. 519. P. 463.
22. Bondorf J., Botvina A.S., Iljinov A.S. et al. // Phys. Rep. 1995. V. 257. P. 133.

Expansion time of the thermal multifragmentation in $^{12}\text{C}(22 \text{ GeV}) + \text{Au}$ interactions

S. P. Avdeyev^{a,*}, W. Karcz^a, V. V. Kirakosyan^a, P. A. Rukoyatkin^a, V. I. Stegaylov^a, A. S. Botvina^b

^aJoint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

^bFrankfurt Institute for Advanced Studies, Johann Wolfgang Goethe University, Frankfurt am Main, 60438 Germany

*e-mail: avdeyev@aol.com

The relative angle correlation of intermediate mass fragments has been studied for $^{12}\text{C} + \text{Au}$ collisions at 22 GeV. Strong suppression at small angles is observed which is due to the Coulomb repulsion of fragments. The experimental correlation function was compared to that obtained by the multibody Coulomb trajectory calculations with the various decay time of fragmenting system. It is found that the average decay time of fragmenting system is less than $59 \pm 11 \text{ fm} \cdot \text{s}^{-1}$.